

Fotometrie a radiometrie – principy měření a pokyny

Přístroje k měření fotometrických veličin (svítivost, světelný tok, osvětlení, atd.) lze v zásadě rozdělit na subjektivní a objektivní.

U *objektivních* fotometrických zařízení se dopadající světelný tok převádí na některou jinou fyzikální veličinu, obvykle elektrickou, kterou lze vhodným způsobem změřit. Pro převádění lze použít různé fotoelektrické elementy, termočlánky, aj. Správně ocejchovaný přístroj dává možnost stanovit fotometrickou veličinu přímo, bez použití srovnávacího normálu. Potíže mohou vzniknout v souvislosti se spektrální citlivostí zařízení. Fotoelektrické veličiny jsou totiž definovány na základě spektrální citlivosti oka. Pro správné měření je proto potřeba, aby provádějící element měl stejnou spektrální citlivost jako lidské oko, což nemusí být vždy snadné splnit. Jinak cejchování přístroje platí vždy jen pro vhodné spektrální složení dopadajícího světla.



Obr. 1 Příklad přístroje na měření osvětlení: Luxmetr VC – 4in1

K měření osvětlení budeme používat luxmetr ocejchovaný přímo v luxech. Luxmetr LX 1108 s externí sondou pro měření osvětlení má možnost výběru kalibrace pro 4 různé typy světla (žárovka, zářivka, sodíková výbojka a rtuťová výbojka). V našem případě vybereme měření v módu žárovka. (V případě měření pomocí multimetru VC - 4in1 vybereme funkci luxmetr zeleným tlačítkem Select.) Ze změřeného osvětlení E ve vzdálenosti r při kolmém dopadu světla na sondu luxmetru lze určit svítivost J zdroje světla.

$$J = E r^2 \quad (1)$$

Měření provedeme při několika různých vzdálenostech r v celém rozsahu optické lavice (diskutujte přesnost měření).

Svítivost světelných zdrojů může různým způsobem záviset na směru. V obecném případě je tato směrová závislost charakterizována *fotometrickým tělesem*. Z pevného bodu (počátku) vyneseme vektory všech možných směrů takové, že velikost každého vektoru udává svítivost zdroje v příslušném směru. Fotometrické těleso je vytvořeno koncovými body těchto vektorů. *Fotometrický diagram* charakterizuje stejným způsobem směrovou závislost

svítivosti v určité rovině (např. horizontální či vertikální), je to tedy vlastně úhlová závislost svítivosti vynesena v polárních souřadnicích.

Svítivost mnoha plošných rovinných zdrojů J splňuje s větší či menší přesností Lambertův zákon

$$J = J_0 \cos \vartheta , \quad (2)$$

kde ϑ je úhlová odchylka od normály plochy zdroje a J_0 konstanta nezávislá na směru. Pro srovnání vynesete naměřené hodnoty svítivosti plošného zdroje do fotometrického diagramu, kam zakreslíte rovněž křivku (2).

Jas B plošného zdroje je dán vztahem

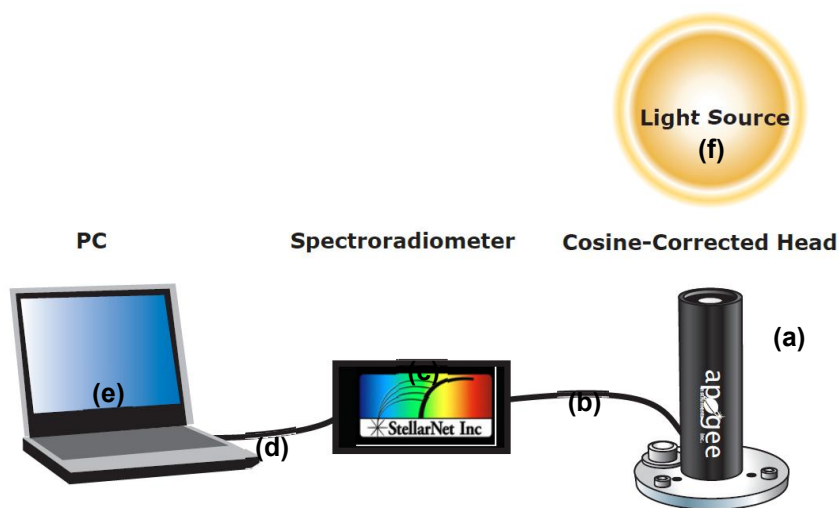
$$B = \frac{J}{S \cos \vartheta} , \quad (3)$$

kde S je plocha zdroje. Jas zdroje splňujícího Lambertův zákon (kosinový zářič) tedy nezávisí na směru.

Po skončení měření s luxmetrem zakryjte ihned sondu luxmetru krytem.

Radiometrické veličiny charakterizují energetické a výkonové vlastnosti záření nejen ve viditelné části spektra. K radiometrickým měřením se opět používá objektivních zařízení, která dopadající zářivý tok převádějí na měřitelnou elektrickou fyzikální veličinu. Patří k nim fotodetektory, termočlánky, dozimetry atd.

Chceme-li zároveň sledovat i spektrální vlastnosti radiometrických veličin, použijeme aparaturu založenou na spektrometru. Příkladem je měřicí aparatura schematicky znázorněná na obr. 2.



Obr. 2 Ukázka sestavy aparatury k měření spektrometrických veličin

V praktiku je pro měření úlohy připraven vláknový spektrometr Apogee PS-300 **(c)**. Pracuje v rozsahu vlnových délek 300 až 1000 nm s rozlišením 2 nm. Do vstupu spektrometru je světlo přivedeno světlo otickým vláken **(b)** s připojenou sondou s kosinovým korektorem **(a)**. Takto je aparatura ocejchována v měřicím módu „Radiometer“ na měření veličin: „Power“ ($\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$), „Photon flux“ ($\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$) a „Luminosity“ (lux m^{-2}).

Intenzitu osvětlení E světelným zdrojem lze stanovit integrací změřené spektrální závislosti intenzity osvětlení přes viditelnou oblast spektra.

$$E = \int_{400}^{700} E(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

Intenzitu ozáření E_e získáme obdobně integrací změřené závislosti ozáření na vlnové délce.

Při stanovování světelného toku Φ ze změřené intenzity osvětlení ve vzdálenosti r od světelného zdroje v jednom určitém směru lze použít vztahu platného pro izotropní zdroje světla.

$$\Phi = 4 \pi E r^2 \quad (5)$$

Musíme mít ale na paměti, že v případě anizotropního zdroje světla není svítivost do všech směrů stejná. Tedy pro stanovení správné hodnoty světelného toku anizotropního zdroje, odpovídající např. údají o světelném toku od výrobce, bychom museli změřit úplný prostorový fotometrický diagram. Obdobně lze získat zářivý tok Φ_e .

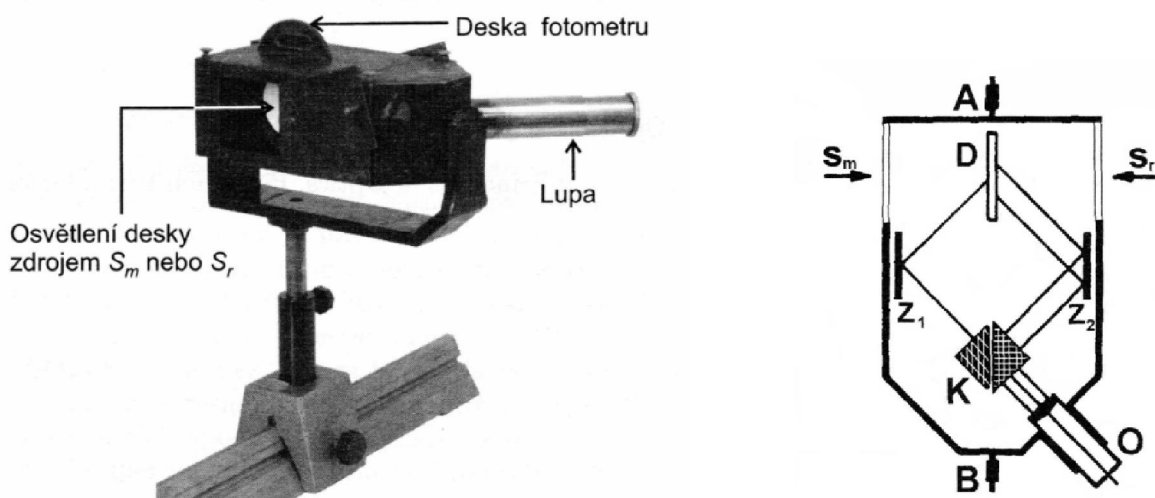
Světelný tok Φ lze určit přepočtem zářivého toku Φ_e na citlivost standardního oka pro denní vidění. Tato citlivost je vyjádřena křivkou spektrální citlivosti běžného lidského oka $K(\lambda)$, která je tabelována (např. i v normách ČSN, DIN atd.). Oko je nejcitlivější pro vlnovou délku 555 nm, funkce $K(\lambda)$ je pro tuto vlnovou délku normována. Jednotka lumen je definována tak, že na této vlnové délce (555 nm) odpovídá 1 W zářivého toku 683 lumenům světelného toku. To tedy znamená, že světelný tok je spojen se spektrální hustotou zářivého toku vztahem

$$\Phi = K_m \int_{380}^{780} K(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

Konstanta K_m odpovídá maximální světelné účinnosti denního vidění, její hodnota $K_m = 683 \text{ lm.W}^{-1}$. Křivku v digitalizované podobě mají studenti praktika k dispozici ke stažení na stránce se zadáním úlohy.

Návod na ovládání spektrometru Apogee je přiložen u aparatury.

Ačkoliv to není v povinné náplni úlohy, zmíníme se ještě o subjektivním způsobu měření fotometrických veličin. U *subjektivních* přístrojů se využívá možnosti rozhodnout při vizuálním pozorování, zda sousední plochy vysílají světlo stejné barvy, mají stejný jas. Měření je v tomto případě vždy relativní, měřený zdroj světla porovnáváme s normálovým zdrojem, jehož fotometrické hodnoty jsou známy. Zorné pole přístroje je rozděleno na části, z nichž některé jsou osvětleny měřeným zdrojem, jiné normálem (fotometrické pole). Intenzitu osvětlení od jednoho nebo od obou zdrojů lze definovaně měnit. Nastavíme-li celé zorné pole na stejný jas, lze z nastavení přístroje určit poměr svítivostí obou zdrojů, poměr jejich jasů či dalších fotometrických veličin.



Obr. 3 Lummerův-Brodhunův fotometr včetně znázornění jeho vnitřního uspořádání

Pro měření svítivosti lze použít například Lummer-Brodhunův fotometr, jehož principiální uspořádání vidíme na obr. 3. Každý z obou porovnávaných světelných zdrojů S_m , S_r osvětluje jednu stranu desky D s bílým rozptylujícím povrchem. Světlo difusně odražené na obou stranách se po odrazu na zrcadlech Z_1 , Z_2 pozoruje Lummerovou-Brodhunovou kostkou K , která vytváří fotometrické pole. Skládá se ze dvou pravouhlých hranolů, které k sobě přiléhají přeponovými stěnami. Přeponová stěna jednoho, např. levého hranolu, je na okrajích sbroušena tak, že pouze její střední část je v optickém kontaktu se stěnou pravého hranolu. Touto střední částí může světlo kostkou nerušeně procházet v původním směru. Při pozorování kostky lupou O zaostřenou na styčnou plochu hranolu tedy vidíme ve středu zorného pole světlo přicházející z levého povrchu desky D . Na krajích přeponové stěny pravého hranolu dochází k úplnému odrazu, takže světlo v okrajové části zorného pole přichází z pravého povrchu desky D . Vyrovnání obou částí zorného pole na stejný jas se zde provádí změnou vzdáleností r_m , r_r zdrojů S_m , S_r od desky D . Svítivost zdrojů označme J_m , J_r . Při vyrovnání jsou osvětlení

$$E_m = \frac{J_m}{(r_m)^2}, \quad E_r = \frac{J_r}{(r_r)^2} \quad (7)$$

obou stran desky **D** stejné, takže je-li např. **S_r** normálový zdroj se známou svítivostí, lze svítivost zdroje **S_m** určit ze vztahu

$$J_m = J_r \frac{(r_m)^2}{(r_r)^2} . \quad (8)$$

Pro vyloučení vlivu případných nesouměrností povrchů desky **D** a zrcadel **Z₁**, **Z₂** je možno celý přístroj otočit o 180° kolem osy **AB**, měření opakovat a jako výsledek brát průměr obou získaných hodnot. Aby bylo možné vyrovnání jasu obou polí přesně provést, musí být splněna podmínka, že oba zdroje mají stejnou barvu světla.

Po skončení měření uzavřete ihned kryty Lummerova-Brodhunova fotometru.